

砂岩地层多线隧道并行施工风险防控及结构安全分析*

马晓波

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安)

摘 要 [目的] 多线隧道并行施工过程中, 后行隧道开挖会对既有隧道造成不利的扰动影响。相较于双线隧道, 多线隧道并行施工导致的扰动问题更为复杂, 因此需针对其风险防控策略及结构安全开展研究。[方法] 以某轨道交通区间线路和停车场站暗挖隧道工程为例, 对其进行风险识别、防控及安全分析。利用结构可靠度准则量化判定 3 线隧道并行施工时的强影响区域。介绍了针对强影响区域内的既有暗挖隧道风险防控方法, 即洞内加固措施。建立三维精细化数值模型, 分析隧道不同并行施工阶段对应的地面沉降和既有隧道受力变形情况, 评估了结构安全状态和加固措施的可靠性。[结果及结论] 净距较小的既有暗挖隧道在右线盾构开挖过程中表现出明显的位移和变形, 后行盾构隧道造成的扰动影响随着其与先行隧道间距离的增加呈现出明显的降低趋势。采用横撑和拱棚的整体加固措施能够有效减缓由于后行盾构隧道施工扰动导致的既有结构额外变形和受力。

关键词 多线隧道; 并行施工; 风险防控; 结构安全

中图分类号 U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.006

Risk Prevention-control and Structural Safety Analysis of Multi-line Tunnel Parallel Construction in Sandstone Strata

MA Xiaobo

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China)

Abstract [Objective] During the parallel construction of multi-line tunnels, the excavation of subsequent tunnels will adversely disturb existing tunnels. Compared to double-line tunnels, the disturbance caused by multi-line tunnel parallel construction is more complex, necessitating researches on risk prevention-control strategies and structural safety. [Method] Using a rail transit interval line and depot station underground excavation tunnel project as example, risk identification, prevention-control and safety analysis are conducted. The structural reliability criteria are used to quantify and determine highly

affected areas during three-line tunnel parallel construction. The risk prevention-control measures for existing underground excavation tunnels in these highly affected areas, specifically in-tunnel reinforcement measures are introduced. A three-dimensional refined numerical model is established, the land subsidence and existing tunnel stressed deformation corresponding to different stages of tunnel parallel construction are analyzed, and the structural safety states and reliability of reinforced measures are evaluated. [Result & Conclusion] Existing underground excavation tunnels with small clearance exhibit significant displacement and deformation during the excavation of the right-line shield tunnel. The disturbance impact caused by the subsequent shield tunnel decreases significantly as the distance from the preceding tunnel increases. The overall reinforcement measures using cross braces and arch canopies can effectively mitigate the additional deformation and stress on existing structures caused by the disturbance of subsequent shield tunnel construction.

Key words multi-line tunnel; parallel construction; risk prevention-control; structural safety

0 引言

由于隧道开挖将不可避免地引起周围地层应力分布发生变化, 近年来, 近接施工已成为了隧道安全控制的关键环节, 研究近接施工过程中的隧道受力变形响应特征是精准判断风险的必要前提。文献[1]分析了双线暗挖隧道以斜角度近距离下穿既有隧道时的结构稳定性, 并基于位移和应力演变规律评估了施工危险范围。文献[2]采用理论方法讨论了 3 条并行隧道近接施工时的影响分区, 定量比较了不同准则导致的分区差异性。文献[3]结合现场实测方法, 研究了盾构隧道下穿施工引起的既有上部隧道变形规律, 并根据线性回归结果预测了

* 陕西省科学研究与发展计划项目(2016TKC-07)

地面长期沉降情况。文献[4]分析了施工方法等因素对并行隧道相互扰动程度的影响,提出了可供参考的建议与方案。文献[5-6]的研究结果表明,对于采用不同开挖方法的小净距并行隧道,施工顺序可能导致扰动结果发生显著变化。文献[7]发现,即使隧道施工顺序无法改变,针对具体工法开展优化设计,同样能够在一定程度上缓解后行隧道对先行隧道的不利影响。此外,对后行隧道采取加固处理,如注浆或支护结构等,也是常用的风险控制手段^[8]。

然而,由于施工环境不同且多线隧道空间位置迥然相异,隧道并行施工问题普遍具有独特性。基于某些特定工程得到的研究成果可能呈现相似的趋势化规律,但具体的量化结论几乎不可能相同,有效的安全控制措施亦难以通用。因此,为拟定可靠的复杂多线隧道并行施工风险防控措施,并确保结构的安全状态,有必要依托工程的具体特征开展详尽分析。

本文以某轨道交通区间盾构隧道及中段停车场站出入线暗挖隧道工程为例,针对多线隧道并行施工风险识别、防控和安全状态开展研究。首先,结合量化方法合理确定近接并行施工的不同影响区域;分析过程中,重点关注后行隧道施工对地面沉降、先行隧道变形和受力分布的影响规律;最终,根据加固结构的受力情况和实际监测结果,综合评估和判断风险防控措施的可信性及有效性。本文研究可为类似工程的风险预估和合理化控制提供指导。

1 工程概况

某轨道交通线路里程全长约12 km,均为地下线,沿途共设11座车站,10个区间,并在线路中段位置另设一个停车场与其中一座车站直接连通。所有区间均采用双线盾构隧道连接,隧道内径为5.7 m,外径为6.4 m,管片幅宽为1.5 m。停车场站与车站之间的出入场线采用明挖、暗挖相结合的方式修建。其中,暗挖段靠近车站,且位于区间隧道中间,总长约为300 m。此外,出入场线隧道与区间隧道之间的净距在靠近车站的过程中逐渐减小,最小处不超过1 m。线路主要处于强风化粉砂岩地层中,上部还有填土、黄土和卵石土等其他地层,地质环境相对复杂。并行施工区域中,地层及隧道的平面与立面示意图如图1所示。

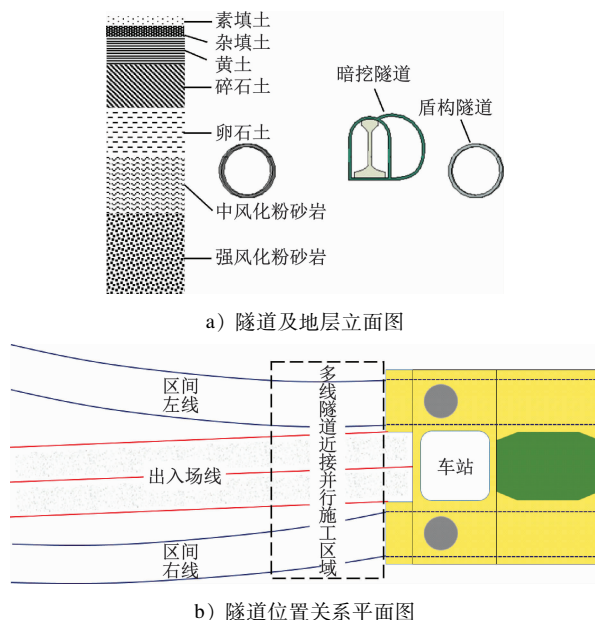


图1 地层及隧道的平面与立面示意图

Fig. 1 Diagram of stratum and tunnel plan and elevation

2 多线隧道并行施工影响范围识别

考虑到施工过程中,后行区间隧道对先行暗挖隧道可能造成较大的扰动影响,必须提前明确风险并采取可靠的防控措施。其中,首要任务是识别多线隧道并行施工的影响范围。

为避免判断过程受人为主观意识影响,本文采用基于结构可靠度准则的近接影响范围定量识别法^[9]。识别近接影响情况的接近影响度系数 A_{ij} 可以表示为:

$$A_{ij} = L_{ij} \varphi_{1ij} \varphi_{2ij} \varphi_{3ij} \varphi_{4ij} \varphi_{5ij} \varphi_{6ij} \quad (1)$$

式中:

φ_{1ij} ——几何接近度影响系数;

φ_{2ij} ——地质情况影响系数;

φ_{3ij} ——隧道开挖工法影响系数;

φ_{4ij} ——施工设计策略影响系数;

φ_{5ij} ——先行隧道结构安全状态影响系数;

φ_{6ij} ——多线隧道空间位置关系影响系数;

L_{ij} ——除上述影响系数外的其他综合因素影响系数,即选定基准情况时对应的影响度,可通过假定所选基准与影响度之间的线性、非线性关系进行取值,具体计算方法参考文献[2];

i ——影响因素类型;

j ——判断基准。

基于接近影响度系数,具体影响水平判断准则为:

$$\begin{cases} 0 \leq A_{ij} < 1, & \text{无影响} \\ 1 \leq A_{ij} < 2, & \text{弱影响} \\ A_{ij} \geq 2, & \text{强影响} \end{cases}$$

对于无影响区域,可不进行任何处理;对于弱影响区域,应加强监测,根据工程实际情况开展处置;对于强影响区域,必须在后行隧道施工前采取加固措施。

本工程区间左线盾构隧道、连接线暗挖隧道右洞和中洞均已贯通,重点关注盾构右线施工对暗挖隧道的影响。根据影响度系数计算结果可知,距离车站 24.7 m 范围内均属于强影响区域。因此,针对该范围既有暗挖隧道进行加固处理。

3 施工风险防控措施

根据工程实际进度情况,预计区间右线盾构隧道贯通前,连接线暗挖隧道已完成段无法开展二次衬砌(以下简称“二衬”)施工,该段仅有 30 cm 厚的初期支护(以下简称“初支”)。基于此,必须采取可靠的加固手段,以确保既有结构在后行隧道扰动条件下的安全状态。结合专家综合研判结果与相关经验,拟采取洞内加固的整体施工思路,既有暗挖隧道加固措施示意图如图 2 所示。

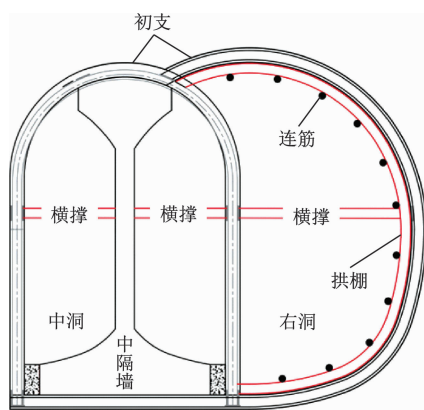


图 2 既有暗挖隧道加固措施示意图

Fig. 2 Diagram of reinforcement measures for existing underground-excavated tunnel

由于既有暗挖隧道右洞与区间右线最近,导致其所受扰动和不利影响最大。因此,在右洞中采用拱棚进行全截面加固支护,增强隧道结构对扰动的抵抗能力。拱棚由 I 20 工字钢制成,每榀间隔距离不大于 3 m(实际施工时取每榀间距为 3 m)。拱棚工字钢在工厂内分段加工定形并运送至洞内拼装,每榀拱棚间借助 $\phi 25$ mm 钢筋焊接连接形成整体。

连接钢筋沿拱棚环向分布,间隔不大于 1.5 m,实际施工时共设置 11 道连接钢筋。此外,考虑到中洞和右洞的横向跨度较大,仅依靠拱棚可能不足以保证结构的横向承载能力。因此,沿隧洞中线位置进一步设置横撑。横撑亦采用 I 20 工字钢,并使其一端与拱棚焊接连接,另一端顶紧于侧墙或中隔墙。需要注意的是,紧邻出口处的结构稳定性相对其他位置更差、近接距离更小,故此处对应的加固构造也进行了适当加密。施工时,对于距离出口段 3 m 范围内的拱棚,其间隔不大于 1 m。上述加固措施于右线盾构隧道掘进至距离车站 50 m 前施作完毕。

4 多线隧道并行施工安全分析

4.1 三维数值模型

假设地层水平均匀分布,建立水平方向 60 m、竖直方向 40 m、开挖方向 30 m 的三维数值模型。模型顶面为自由面,其他面设法向约束。整体三维数值模型及局部细节示意图如图 3 所示。

为研究区间右线隧道施工开挖对已贯通隧道结构的影响,同时建立了包含区间左线隧道、入场线暗挖隧道和区间右线隧道在内的 3 条并行隧道,并充分考虑了 3 条并行隧道在空间上的位置关系。在右线盾构隧道开挖前,先开展左线隧道和暗挖隧道开挖、地应力平衡模拟。为避免结构简化对计算结果可能造成的不利影响,采用拱棚和横撑的精细化模型,而非常规的刚度等效处理法。此外,模型还增加了暗挖隧道初支的配筋构造,以更加全面地评估暗挖隧道的安全状况。

4.2 计算参数

线路所处的强影响区域土体自上而下分别为素填土、杂填土、黄土、碎石土、卵石土、中风化粉砂岩和强风化粉砂岩。数值分析过程中,采用 Mohr-Coulomb 模型反映岩土体的弹塑性特性。土层物理力学参数如表 1 所示。

隧道及支护结构中包含的混凝土均视为各向同性的弹性材料。其中,初支、中隔墙、盾构管片采用不同标号的混凝土,分别为 C25、C40 和 C50。盾壳、工字钢、连接筋和支护配筋等钢材均采用理想弹塑性本构,但弹性模量根据实际情况存在差异。此外,除盾壳采用壳单元模拟外,其他结构均采用实体单元模拟。隧道及支护结构计算参数如表 2 所示。

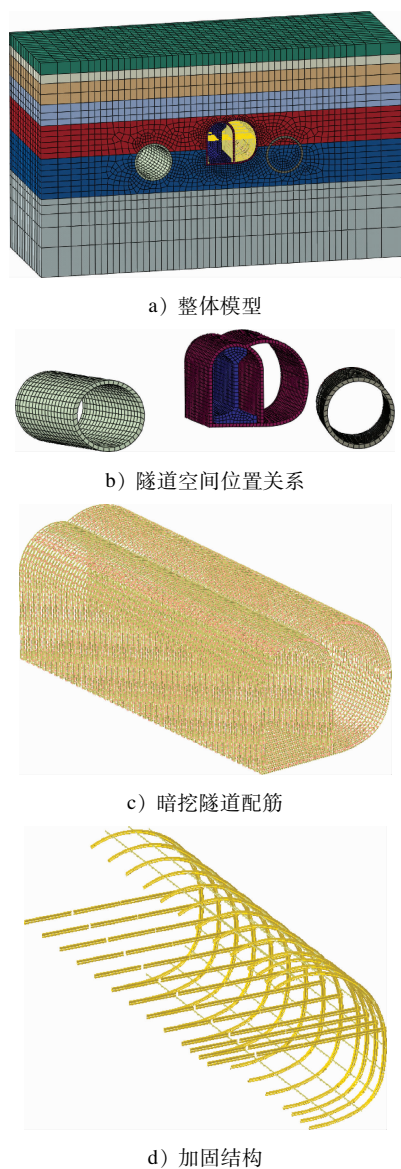


图 3 整体三维数值模型及局部细节示意图
Fig. 3 Diagram of overall 3D numerical model and local details

表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layer				
土层名称	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
素填土	19.2	5	10	12
杂填土	18.4	5	15	12
黄土	22.7	55	8	38
碎石土	21.2	73	12	36
卵石土	23.0	55	2	38
中风化粉砂岩	22.1	42	7	27
强风化粉砂岩	22.8	66	7	28

表 2 隧道及支护结构计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of tunnel and support structures

名称	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
初支	23.0	22.3	0.20
中隔墙	24.0	31.6	0.20
盾构管片	26.0	28.0	0.20
盾壳	78.0	250.0	0.25
拱棚工字钢	78.5	220.0	0.25
横撑工字钢	78.5	220.0	0.25
连接筋	78.0	210.0	0.25
初支配筋	78.0	205.0	0.25

盾构机对已成型管片的推力按照实际记录的最大值选取,为 12 000 kN。数值分析时,区间右线盾构每步开挖 1.5 m,作用在开挖面上的土压平衡力 P 可以表示为:

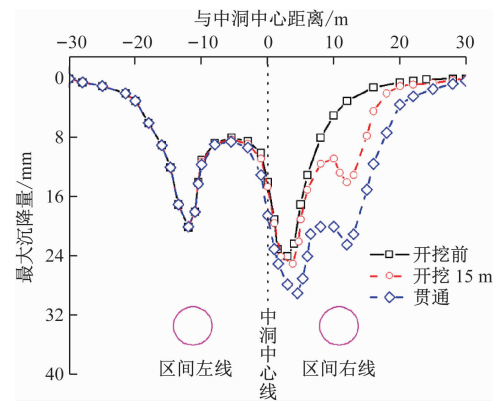
$$P = k\gamma_0 h \tag{2}$$

式中:

- k ——侧压力系数;
- γ_0 ——加权重度;
- h ——隧道埋深。

4.3 地面沉降分析

右线盾构隧道不同施工阶段的地面最大沉降量如图 4 所示。由于区间左线盾构隧道和出入场线暗挖隧道中洞、右洞均已提前贯通,因此,盾构右线施工前,地面已出现一定的沉降变形量。



注:横坐标以背离中洞中心线向区间左线为负,以背离中洞中心线向区间右线为正。

图 4 右线盾构隧道不同施工阶段的地面最大沉降量
Fig. 4 Land maximum subsidence of right-line shield tunnel at different construction stages

整体而言,右线盾构开挖前地面最大沉降沿水平方向呈近似 W 形分布,这与既往双线隧道开挖模

拟得到的相关规律是一致的。造成上述分布特征的主要原因是,左线区间盾构隧道和出入场线暗挖隧道分别开挖,导致各自正上方地面发生沉降,且两条隧道引起的沉降相互叠加。就具体沉降值而言,暗挖隧道中洞和右洞对应的最大沉降值更大。这是由于暗挖隧道断面尺寸更大,且仅完成初支施工,对周边地层的扰动程度也更大,因此导致其对应的地面沉降值与左线盾构隧道的地面沉降值相比有所上升。

当右线盾构隧道开挖至 15 m 时,地面沉降出现了另一条明显的沉降槽,且右线开挖导致的沉降与既有暗挖隧道导致的沉降进一步叠加,造成最大沉降值有所增大。然而需要注意的是,暗挖隧道上部地面沉降值增大得不多,说明此时暗挖隧道及周围土体受扰动程度较小,这可能是由于此段大部分区域仍属于并行施工的弱影响区。

当右线盾构隧道完全贯通后,地面沉降最大值有所增大,由最初的 25 mm 左右增至近 30 mm。由此可知,随着右线盾构隧道与暗挖隧道之间的净距不断增加,尽管采取了加固措施,但其对暗挖隧道造成的扰动影响仍不可忽视。

总体而言,右线盾构隧道开挖对既有结构的影响随着其与暗挖隧道间距离的延伸而有所降低,仅从地面沉降判断,其对左线盾构隧道的影响很小。

4.4 先行隧道变形分析

右线盾构隧道开挖前和贯通后,先行左线盾构隧道和暗挖隧道的竖向变形云图如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可知:右线盾构隧道开挖前后,既有左线盾构隧道的竖向变形分布几乎并未改变,仍保持其自身开挖贯通后的变形特征,即拱顶沉降、拱底隆起;在右线盾构隧道开挖过程中,左线盾构隧道的竖向变形整体上表现为隆起的趋势,但变化数值较小,未超过 1.0 mm。上述结果表明,左线先行盾构隧道受右线盾构隧道开挖的扰动影响较小,这与根据地面沉降值变化判断得到的结论是一致的。

由图 6 可知:右线盾构隧道开挖前后,暗挖隧道竖向变形不论在分布特征还是具体数值方面均出现了明显变化;暗挖隧道整体结构的最大竖向变形由 2.0 mm 增长至 5.6 mm,且集中在右洞拱底部位,其余部分变形相对较小。上述结果表明,采用加固措施后,右线盾构隧道开挖对先行暗挖隧道造成的扰动大部分作用在与其距离最近的区域,其不

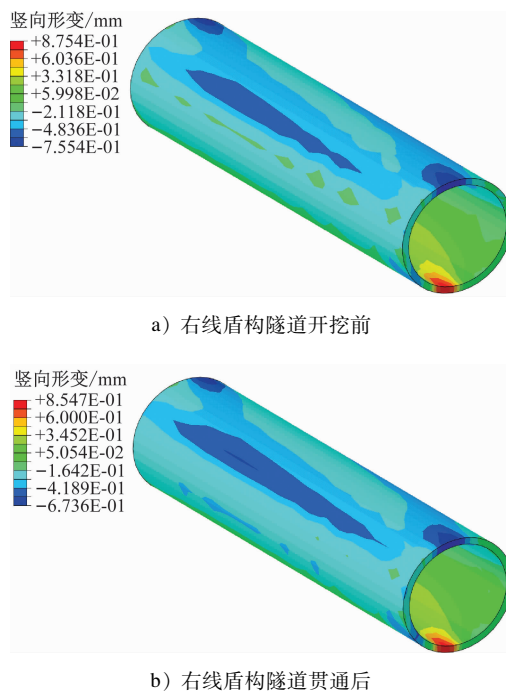


图 5 不同阶段下先行左线盾构隧道竖向变形云图

Fig. 5 Nephogram of preceding left-line shield tunnel vertical deformation at different stages

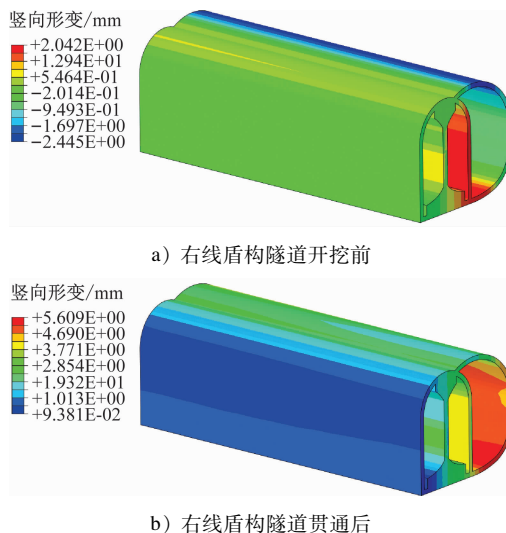


图 6 不同阶段下暗挖隧道竖向变形云图

Fig. 6 Nephogram of underground-excavated tunnel vertical deformation at different stages

利影响随着右线盾构隧道与暗挖隧道间距离的增大而减小。此外,暗挖隧道的竖向位移整体表现为一定程度的抬升,这与地面沉降的增大趋势是相反的。由此可见,虽然后行隧道对周围地层和既有结构均存在影响,但其影响趋势不一定完全相同。

4.5 暗挖隧道受力分析

由于地面沉降结果和结构变形结果均显示左

线区间隧道受右线盾构隧道开挖影响较小,故重点分析入场线暗挖隧道的受力情况。右线贯通后,暗挖隧道结构混凝土及配筋受力情况云图如图 7 所示。

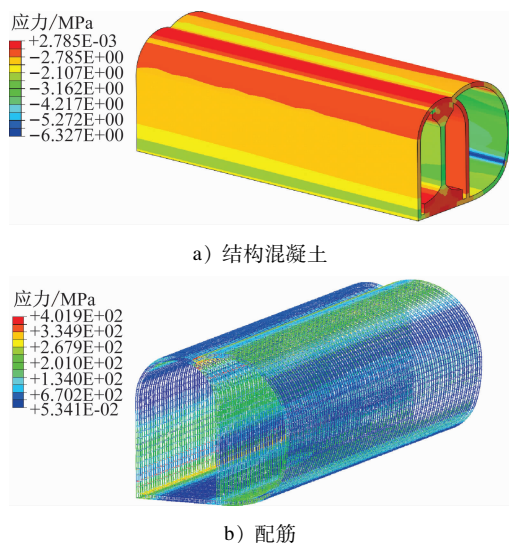


图 7 右线贯通后暗挖隧道结构混凝土及配筋受力情况云图

Fig. 7 Stress nephogram of underground-excavated tunnel structure concrete and rebar after the right-line connection

由图 7 a)可知:先行暗挖隧道中洞和右洞的混凝土压应力均处于较低水平,最大值仅为 6 MPa 左

右,满足所使用的混凝土设计抗压强度值;在右洞拱底区域存在较为突出的应力集中现象,此位置恰好与结构最大变形区域重合,而其余位置压应力分布较为均匀。这表明应力集中现象可能是由于较大的扰动变形引起的。另一方面,暗挖隧道右洞靠近后行盾构隧道边墙位置的压应力明显高于中洞墙体处的压应力,进一步揭示了扰动与距离的相关性,即靠近新开挖隧道区域的既有结构受扰动影响更大。

由图 7 b)可知:暗挖隧道初支配筋在中洞侧墙底部、右洞拱顶和拱底位置处受到的应力较大;除靠近出口段极小部分区域的配筋达到屈服状态,其余位置处的钢筋应力均处于正常水平,可以认为其受力结果符合安全要求。考虑到暗挖隧道右洞采取的拱棚加固措施可能在一定程度上替代了隧道初支受力,故尽管右洞边墙处的配筋受力较小,但这并不能说明该处结构未受扰动影响。

4.6 加固措施可靠性与必要性分析

在采取加固措施的前提下,地面沉降变形、先行隧道结构受力变形等结果均满足安全要求,验证了加固措施的可靠性。此外,为了分析加固措施的必要性,进一步计算了未采用加固措施条件下既有结构的受力变形情况。采用加固措施和未采用加固措施条件下,不同安全控制指标对比如表 3 所示。

表 3 两种条件下的安全控制指标对比

Tab.3 Comparison of safety control indicators under two conditions

项目	暗挖初支压力/MPa	暗挖初支配筋应力/MPa	暗挖隧道水平变形/mm	暗挖隧道竖向变形/mm	地面沉降量/mm
采用加固措施	6.3	401.8	7.1	5.6	29.6
未采用加固措施	9.2	405.2	11.4	9.7	36.4

与采用加固措施相比,未采用加固措施时,各项安全控制指标的计算结果均有所提升。其中,虽然初支配筋应力提升的百分比较小,但屈服钢筋数量明显增多,说明结构安全已受到威胁,具有较大的施工风险。此外,暗挖隧道水平变形也由 7.1 mm 提高至 11.4 mm,进入了报警范围。由此可知,采用加固措施是十分必要的。

右线隧道开挖过程中,加固结构的最大受力云图如图 8 所示。由图 8 可知:无论是横撑还是拱棚,其所受应力均已达到相当高的水平,且显著高于同区域的暗挖隧道初支配筋应力。由此可知,加固结构在暗挖隧道受扰过程中发挥了明显的效果,很好地起到了增强结构抵抗能力的作用。

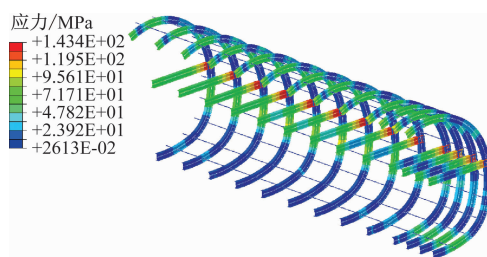


图 8 右线隧道开挖过程中加固结构的最大受力云图

Fig. 8 Maximum stress nephogram of reinforced structure in the process of right-line tunnel excavation

4.7 数值与监测结果对比分析

根据数值分析结果,实际施工过程采用了拱棚+横撑形式的组合加固措施,并在地面沿水平方

向开展了沉降监测。右线隧道贯通后的地面监测与数值计算结果对比,如图9所示。

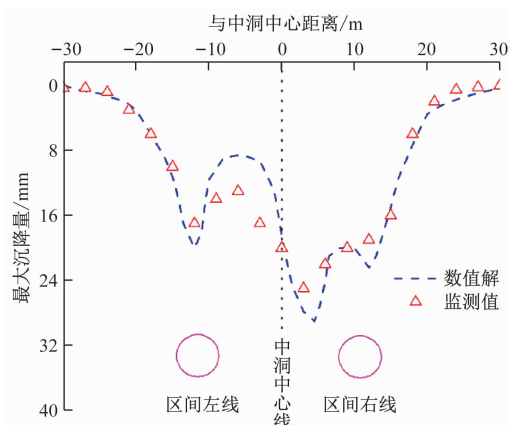


图9 右线隧道贯通后的地面监测与数值计算结果对比

Fig. 9 Comparison of ground monitoring and numerical calculated results of right-line tunnel cutting through

由图9可知:实际监测结果与数值计算结果在整体上的变化趋势是一致的,但在具体数值上存在一定的差异;对于远离隧道的左、右两侧区域,实际监测到的地面沉降略小;相比于数值计算结果,暗挖隧道与左线隧道中间位置处的实际沉降值有所增大,而其余位置处的地面沉降值均小于数值计算结果。整体来看,沉降值的数值解基本包络了实际监测结果,可以认为数值解是保守且偏安全的。

此外,暗挖隧道与后行右线盾构隧道开挖导致的叠加沉降分布形态与数值计算结果表现出了不同特征,实际监测到的右线盾构隧道中心正上方的沉降值小于叠加区的沉降值,最终并未形成明显的新沉降槽。这可能得益于右线盾构隧道实际开挖过程中掘进参数控制较好,进而由施工引起的隧道正上方地面沉降与其他位置的地面沉降相比差距不明显。此外,暗挖隧道加固后,开挖隧道周围地层的抗扰动能力也随之有所增强,这也可能导致了新建隧道上方的地层变形出现减小现象。

5 结语

针对砂岩地层多向隧道并行施工风险控制及安全问题,采用三维精细化有限元数值计算和实测分析方法展开研究,基于不同的安全指标分析了加固措施的必要性、可靠性及结构的安全状况。主要获得以下结论:

1) 净距较小的既有暗挖隧道在右线盾构开挖过程中表现出明显的位移和变形,但距离更远的先

行左线盾构隧道几乎不受影响。多线隧道并行施工过程中,后行盾构隧道造成的扰动影响随着其与先行暗挖隧道间距离的增加呈现明显的降低趋势。

2) 采用横撑和拱棚的整体加固措施具有充分的可靠性和必要性,能够有效减缓由于后行盾构隧道扰动导致的既有结构额外变形和受力,可作为类似隧道并行施工情况下的风险防控选择。

3) 实际施工过程中,除提前针对既有隧道结构进行加固处理外,还可通过严格控制后行盾构隧道掘进参数的方法,提高对扰动影响的控制水平,进一步增强既有结构的安全性。

参考文献

- [1] 张青,王洪超,赵耀,等.新建隧道近距离小角度斜下穿既有隧道稳定性分析:以青岛地铁8号线隧道工程为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(增刊2):199.
ZHANG Qing, WANG Hongchao, ZHAO Yao, et al. Stability analysis of new tunnel obliquely crossing underneath adjacent existing tunnel with small angle: a case study of a tunnel of Qingdao Metro Line 8[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 199.
- [2] 王志杰,李金宜,蒋新政,等.浅埋偏压双侧近接隧道影响分区及对策研究[J].现代隧道技术,2021,58(4):1.
WANG Zhijie, LI Jinyi, JIANG Xinzhen, et al. Research on the impact zoning and construction countermeasures for bilateral adjacent tunnels with shallow depth and unsymmetrical load[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(4): 1.
- [3] JIN D, YUAN D, LI X, et al. Analysis of the settlement of an existing tunnel induced by shield tunneling underneath[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2018, 81: 209.
- [4] 汪洪星,吴军,谈云志,等.盾构-矿山法隧道并行施工的相互扰动分析[J].工程地质学报,2017,25(2):344.
WANG Hongxing, WU Jun, TAN Yunzhi, et al. Mutual turbulence analysis for parallel tunnel construction of shield and mine tunneling methods[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 344.
- [5] 王振田.盾构与浅埋暗挖隧道小间距并行施工技术[J].铁道建筑技术,2019(1):82.
WANG Zhentian. Study on small spacing parallel construction technology of shield and shallow buried excavation tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2019(1): 82.
- [6] 张文明.地铁浅埋砂层大跨度、小净距多联隧道并行施工顺序研究[J].城市轨道交通研究,2018,21(6):109.
ZHANG Wenming. On the construction sequence of long span metro tunnel with small distance in shallow buried sand layer[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(6): 109.
- [7] 宋高锐,王渭明,王国富,等.盾构与浅埋暗挖隧道小净距并行施工工法优选[J].科学技术与工程,2021,21(15):6472.

(下转第45页)

模型的相对误差均满足工程需求。对比模型的5个评价指标可知,本文所提 LSTM-DNN 融合模型具有更高的预测精度,可为盾构土仓压力的精准预测提供一种新的方法。

4 结论

1) 提出了 LSTM-DNN 融合模型,实现了土压平衡盾构土仓压力的预测;所提模型可同时提取时序演变和掘进状态特征,验证集上预测的土仓压力最大偏差值为 20 kPa,偏差均值为 5 kPa,最大相对误差为 18%,平均相对误差为 4%,所提 LSTM-DNN 融合模型的预测精度良好。

2) 将所提 LSTM-DNN 融合模型应用于后续连续的 100 环中,模型预测值很好地反映了土仓压力的变化趋势,且其土仓压力的平均偏差为 7.65 kPa,相对误差为 6.09%,可满足工程需求。

3) 将所提 LSTM-DNN 融合模型与深层次的 LSTM 模型、DNN 模型进行对比分析,所提模型 MSE、RMSE、MAE、MAPE、MDE 指标误差均为最小。

参考文献

- [1] YU H, MOONEY M, BEZUIJEN A. A simplified excavation chamber pressure model for EPBM tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 103: 103457.
- [2] 刘宣宇, 张凯举, 邵诚. 基于数据驱动的盾构机密封舱土压预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2898.
LIU Xuanyu, ZHANG Kaiju, SHAO Cheng. Earth pressure prediction in soil chamber of shield machine based on data-driven[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2898.
- [3] LI Z, SHAO C, ZHOU X, et al. Earth pressure prediction in the chamber for earth pressure balanced shield machines[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2018, 57(4): 354.

- [4] 李锟, 田管凤, 马宏伟, 等. 土压平衡盾构掘进参数相关性分析及预测模型[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3814.
LI Kun, TIAN Guanfeng, MA Hongwei, et al. Correlation analysis and prediction model of boring parameters of earth pressure balance shield[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3814.
- [5] 林春金, 杨晓达, 龚英杰, 等. 基于 PSO-BP 的土压盾构土仓压力预测模型及掘进参数敏感性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(5): 1220.
LIN Chunjin, YANG Xiaoda, GONG Yingjie, et al. Prediction model of in-chamber earth pressure for EPB shield based on PSO-BP and parameter sensitivity analysis of tunneling parameters[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(5): 1220.
- [6] 李超, 李涛, 李正, 等. 基于 BP 神经网络的复合地层盾构掘进参数预测与分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊1): 145.
LI Chao, LI Tao, LI Zheng, et al. Prediction and analysis of shield boring parameters in a mixed ground based on BP neural network[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 145.
- [7] 成晓元, 凌静秀, 黄继辉, 等. 土仓压力与掘进参数相关性分析及预测模型[J]. 福建工程学院学报, 2022, 20(1): 13.
CHENG Xiaoyuan, LING Jingxiu, HUANG Jihui, et al. Correlation analysis and prediction model of chamber earth pressure and excavation parameters[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2022, 20(1): 13.
- [8] WEN Z, WANG Z, RONG X, et al. Prediction of the amount of soil discharged by an earth pressure balanced shield machine based on feature engineering[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(12): 4868.

· 收稿日期:2022-10-11 修回日期:2023-01-17 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-11 Revised:2023-01-17 Published:2024-12-10
· 第一作者:王伯芝,正高级工程师,740825286@qq.com
通信作者:丁爽,工程师,dingshuang525@hotmail.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 38 页)

- SONG Gaorui, WANG Weiming, WANG Guofu, et al. Optimization of shield tunneling and shallow buried tunnel with small clear distance in parallel construction[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(15): 6472.
- [8] 赵菁菁, 宿文姬. 深圳地铁近接隧道暗挖施工地表沉降控制[J]. 隧道建设, 2014, 34(11): 1055.
ZHAO Jingjing, SU Wenji. Study on control of ground surface settlement: case study on adjacent tunnel tubes of Shenzhen metro[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(11): 1055.
 - [9] NISHIOKA T, TAKAHASHI K, YASUDA T, et al. Observational

method for tunnel construction in difficult conditions considering environmental impact to groundwater[J]. Journal of the Society of Materials Science, 2003, 52(5): 516.

· 收稿日期:2022-10-28 修回日期:2022-12-13 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-28 Revised:2022-12-13 Published:2024-12-10
· 通信作者:马晓波,高级工程师,36550748@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license